

Co/Cu 多层膜反铁磁第一、第二峰 耦合结构的磁电阻与结构研究*

谭伟石¹ 游彪¹ 张擷秋¹ 吴小山¹ 胡安¹ 蒋树声¹

王俊² 贾全杰² 郑文莉² 姜晓明²

1(南京大学固体微结构物理国家重点实验室, 南京大学物理系 南京 210093)

2(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 确定了 Co/Cu 多层膜的第一和第二反铁磁耦合对应的非磁层 (Cu) 的厚度, 对相同厚度铁磁层 (Co) 制备了第一与第二反铁磁耦合的 Co/Cu 多层膜, 利用同步辐射掠入射 X 射线散射 (衍射) 技术研究了耦合多层膜的界面结构, 探索了耦合多层膜中磁电阻增强的可能原因.

关键词 同步辐射衍射 金属多层膜 磁电阻

1 引言

自 1988 年在磁性金属多层膜中发现巨磁电阻(GMR)效应^[1]以来, 关于磁性金属多层膜 GMR 效应的起源问题一直存在争议. 巨磁电阻效应起源于磁性层中电子自旋磁矩的相对方向的变化引起的散射截面的变化, 即被非磁层分隔开的磁性层中两种自旋极化电子对磁化状态的不同散射截面. 在自旋磁矩反平行状态(反铁磁), 自旋向上和自旋向下电子由 $s-d$ 散射进入劈裂的 d 带, 导致高电阻态(电子平均自由程变短); 而在电子自旋磁矩平行状态(铁磁), 自旋向上电子的散射截面变小, 导致低电阻态^[2]. Parkin 等人研究表明^[3], 随着非磁层厚度的变化, GMR 呈现振荡行为, 这种振荡行为与多层膜中的反铁磁耦合的振荡行为一致. Bruno 等人^[4]从理论上解释了上述振荡行为, 并预言 Co/Cu 多层膜中 {100} 和 {110} 取向比 (111) 取向有更显著的 GMR 效应. Joyce 等人^[5]从实验上证明了 (111) 织构的 Co/Cu 多层膜具有相当小的 GMR 效应, 这与 Parkin 等人^[3]的结果相矛盾. 我们以前的研究^[6]表明, (111) 织构的 Co/Cu 多层膜中层间扩散引起的非晶 Co-Cu (约 0.5nm) 可以明显减低 GMR 值. 本文从磁耦合和结构的角度来探讨第一和第二反铁磁耦合峰组合的 Co/Cu 多层膜的磁电阻效应与结构特征.

* 国家自然科学基金(10023001, 19823002, 19834050)资助

2 实验

Co/Cu 磁性周期多层膜利用磁控射频(直流)溅射技术制备. 溅射背景真空度为 5×10^{-6} Pa, Ar 气氛溅射, 0.1 Pa 溅射气压; 各组元成分的溅射速率经仔细校准; 衬底材料为普通盖玻片, 并经过严格的程序清洗; 为减小衬底材料表面粗糙度对多层膜材料的影响, 在多层膜材料的沉积之前先预沉积约 10 nm 的金属 Ta 薄膜; 为寻找 Co/Cu 多层膜的第一和第二反铁磁耦合对应的 Cu 亚层厚度, 制备了一系列的 Co(2 nm)/Cu(t) 的金属多层膜, Cu 亚层的厚度从约 0.7 nm 变化到约 2.4 nm; 在此基础上, 制备了第一和第二反铁磁耦合峰联合的 [Co(2 nm)/Cu(t₁)/Co(2 nm)/Cu(t₂)]₃₀ 的金属周期多层膜, Ta 薄膜仍用做缓冲层.

磁电阻测量是利用标准的四端点法测量. 测量中电流与磁场在同一平面内且相互垂直, 所加磁场小于 1 T. 用普通的及同步辐射 X 射线衍射和 X 射线掠入射反射方法确定材料的织构和表面、界面微结构、层间扩散等; 俄歇电子能谱技术用来确定多层膜的层状结构.

3 结果及讨论分析

3.1 缓冲层的作用

比较有无缓冲层对多层膜表面、界面的影响对控制多层膜生长有一定的指导意义. 我们制备了没有缓冲层和用 10 nm Ta 作缓冲层的 Co(2 nm)/Cu(1.9 nm) 周期多层膜, 分别

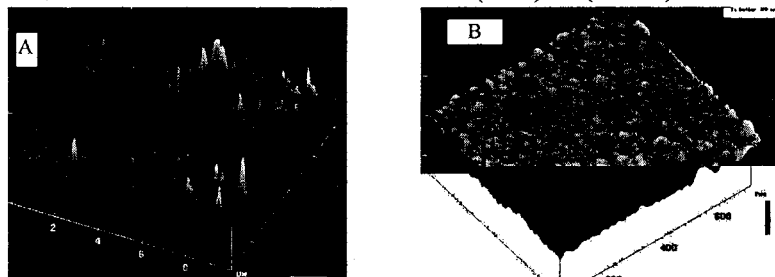


图 1 Co/Cu 周期多层膜的 AFM 图象比较

A: 无缓冲层, B: 有 10 nm Ta 缓冲层.

用 AFM 和掠入射 X 射线反射研究其表面和界面粗糙度、层间扩散等. 图 1 给出了第二反铁磁 Co/Cu 耦合振荡峰对应的多层膜有 10 nm Ta 和没有缓冲层的 AFM 图象, 从图中可以看出, 用 10 nm Ta 做缓冲层的多层膜的表面要比没有缓冲层的多层膜的表面平滑; 另一方面, 从掠入射 X 射线反射的研究也可以得到类似的结论, 图 2 是典型的 X 射线掠入射反射的实验和理论拟合曲线. 从拟合^[6,7]结果发现, 无缓冲层的样品界面粗

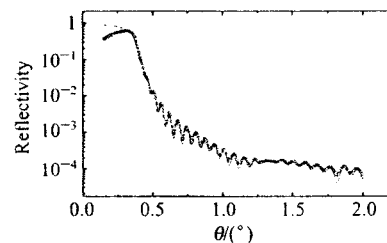


图 2 典型的掠入射 X 射线反射实验和理论拟合曲线

—理论拟合曲线, □ 实验点.

糙度明显大于有 10nm Ta 缓冲层的样品, 前者为 0.62nm, 后者为 0.45nm. 另外, 在无缓冲层的多层膜中还通过拟合得到约 0.5nm 的 Co-Cu 混合层, 主要是层间扩散所致. 上述结论与 AES 结果相吻合.

3.2 Co/Cu 多层膜第一和第二反铁磁振荡峰的确定

虽然缓冲层的存在与否对多层膜的表面、界面和层间扩散有很大的差异, 但对应的反铁磁耦合峰的位置没有很大变化. 图 3 是对应不同 Cu 层厚度变化的系列 Co/Cu 多层膜的磁电阻的变化. 图中 P1, P2 对应反铁磁耦合的第一和第二振荡峰, 分别对应铜亚层厚度为 0.95, 2.04nm. 一般而言, 第一反铁磁振荡峰的巨磁电阻值要大于第二反铁磁振

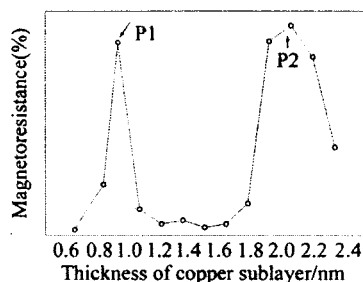


图 3 Co/Cu 周期多层膜中巨磁电阻效应与非磁层厚度的关系

荡峰的巨磁电阻值. 由于实验过程中溅射时间是以秒为单位计算的, 我们无法精确控制溅射铜亚层的厚度, 以至无法获得最佳的第一反铁磁振荡峰. 而我们所确定的反铁磁耦合振荡峰是与文献报道^[2-6]相一致的.

3.3 第一、第二反铁磁耦合振荡峰的混合效应

在上述研究基础上, 用同样条件制备了 $[\text{Co} (2\text{nm})/\text{Cu}(t_1)/\text{Co} (2\text{nm}) / \text{Cu}(t_2)]_{30}$ 的周期多层膜系统. 电磁输运性质研究表明, 该结构的多层膜的巨磁电阻比单独的第一、第二反铁磁耦合的多层膜的巨磁电阻明显增大, 如第一反铁磁振荡峰对应的巨磁电阻值为 17.2%, 第二反铁磁振荡峰对应的巨磁电阻为 18.7%, 而上述样品的巨磁电阻值达到 31.0%.

X 射线衍射研究表明, 样品表现为 fcc Cu 沿 (111) 择优取向, hcp Co 沿 (002) 择优取向. 典型的 X 射线衍射图谱见图 4. 这与在玻璃衬底上生长的 Co/Cu 周期多层膜具有同

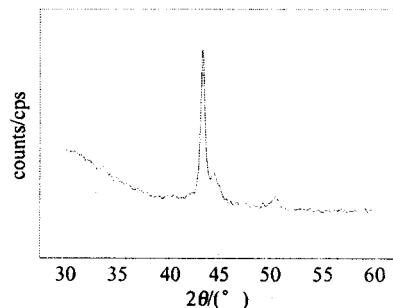


图 4 Co/Cu 多层膜的高角 X 射线衍射图谱

样的择优取向形式^[6]。掠入射 X 射线反射研究表明, 该多层膜系统的表面粗糙度、界面粗糙度及层间扩散都与 Co/Cu 周期多层膜相似。因此我们认为 [Co(2)/Cu(t1)/Co(2)/Cu(t2)]₃₀ 多层膜巨磁电阻的增强不是由于界面附加散射所致, 而是由于磁性层间的交换耦合增强所致。在 [Co(2)/Cu(t1)/Co(2)/Cu(t2)]₃₀ 多层膜中可能还存在 Co/Cu(t1) 与 Co/Cu(t2) 的反铁磁耦合, 从而增加了有无磁场的相对极化度, 导致电子自旋散射截面的变化。

参考文献(References)

- 1 Baibich M N, Broto J M, Fert A et al. Phys. Rev. Lett., 1988, 61:2472
- 2 Edwards D, Mathon J, Muniz R B. IEEE Trans. Magn., 1991, 27:3548
- 3 Parkin S S P, Bhadra R, Roche K P. Phys. Rev. Lett., 1991, 66:2152
- 4 Bruno P, Chappert C. Phys. Rev. Lett., 1991, 67:1602
- 5 Joyce D E, Faunce C A, Grundy P J et al. Phys. Rev., 1998, B58:5594
- 6 WU X S, BIE Q S, LIN Z S et al. Mod. Phys. Lett., 1999, B13:325
- 7 JIANG Xiao-Ming, JIA Quan-Jie, ZHENG Wen-Li et al. HEP & NP, 2000, 24:1185—1190 (in Chinese)
(姜晓明, 贾全杰, 郑文莉等. 高能物理与核物理, 2000, 24:1185—1190)

Magnetoresistance and Structural Studies on Co/Cu Multilayers with the Combination of the first and Second Antiferromagnetic Oscillation Peak*

TAN Wei-Shi¹ YOU Biao¹ ZHANG Jie-Qiu¹ WU Xiao-Shan¹ HU An¹
JIANG Shu-Sheng¹ WANG Jun² JIA Quan-Jie² ZHENG Wen-Li² JIANG Xiao-Ming²

¹ (National Laboratory of Solid State Microstructures, Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

² (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract The first and second antiferromagnetic oscillation peaks with respect to the spacer thickness of Cu in Co/Cu multilayers are determined. With the combination of the first and second oscillation peaks, [Co(2 nm)/Cu(t1)/Co(2 nm)/Cu(t2)]₃₀ multilayer is fabricated and characterized. In contrast to the first and second oscillation peak samples ([Co(2 nm)/Cu(t1)]₃₀) and ([Co(2 nm)/Cu(t2)]₃₀), the enhancement of magnetoresistance(MR) in this combined multilayer is observed. We believe that the enhancement of MR in the combined sample is due to the added coupling between Co(2 nm)/Cu(t1) and Co(2 nm)/Cu(t2).

Key words synchrotron radiation XRD, metal multilayer, magnetoresistance

* Supported by NSFC(10023001, 19823002, 19834050)